

Jarak Optimum *Tie Constraint at Screws* pada *Cold-Formed Steel Built-Up Box Beams* dengan *Four-Point Flexural Loading*

TRI WIDYA SWASTIKA^{1,2*}, HERU PURNOMO¹, HENKI WIBOWO ASHADI¹,
PRAGANIF SUKARNO²

¹Program Studi Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Indonesia, Depok, Jawa Barat, 16424, Indonesia

²Program Studi Teknik Sipil, Politeknik Negeri Jakarta, Depok, Jawa Barat, 16425, Indonesia
Email: tri_widya@ui.ac.id, tri.widyaswatika@sipil.pnj.ac.id

ABSTRAK

Cold-formed steel (CFS) memiliki sejumlah keunggulan: antara lain kekuatan tinggi, ringan, pemasangan cepat dan praktis, tahan terhadap kebakaran, daya tahan yang baik, serta dapat didaur ulang. Namun, balok dengan penampang terbuka yang umum digunakan pada konstruksi rentan terhadap ketidakstabilan akibat ketidaksamaan letak titik geser dan titik berat. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, salah satu solusi yang banyak digunakan adalah penggunaan balok dengan built-up section. Penelitian ini menyajikan studi eksperimental mengenai pengaruh variasi jarak tie constraint at screws pada CFS built-up box beams terhadap pembebanan lentur empat titik. Enam spesimen balok dengan bentang 1.300 mm diproduksi dari profil C75×35 dengan tebal 0,75 mm; kemudian dirakit secara berhadapan menjadi penampang kotak dengan menggunakan self-drilling screw yang dipasang sepanjang sayap untuk berfungsi sebagai tie constraint at screws. Tiga konfigurasi jarak sekrup digunakan, yaitu H; 2H; dan 5,5H; dengan H adalah tinggi penampang. Semua pengujian dilakukan pada kondisi tumpuan sederhana. Hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi jarak tie constraint at screws berpengaruh signifikan terhadap perilaku lentur CFS built-up box beams. Berdasarkan hasil yang diperoleh, jarak sekrup 5,5H direkomendasikan untuk aplikasi desain pada kondisi pembebanan lentur empat titik.

Kata kunci: *cold-formed steel, built-up box beams, jarak tie constraint at screws, eksperimental*

ABSTRACT

Cold-formed steel (CFS) has many advantages, including high strength, lightweight, fast and practical installation, durability, recyclable, non-combustibility, and simple manufacturing procedures. However, since the shear center and the centroid of the cross-section do not coincide, open-section beams are prone to instability modes. To address this issue, researchers have used doubly symmetric built-up sections or built-up closed sections beams. This study presents an experimental investigation on CFS built-up box beams with varying screw spacing arrangements. Six beam specimens; each with a span of 1,300 mm; were subjected to four-point bending tests. The beams were fabricated from C75×35 profiles with a thickness of 0.75 mm, assembled face-to-face into built-up box sections using self-drilling screws positioned along the flanges to act as tie constraint at screws. Three screw spacing configurations were considered—H, 2H, and 5.5H—where H denotes the section depth. All tests were conducted under simple support conditions. Findings indicate that screw spacing significantly influences the flexural behavior of CFS built-up box beams. Based on the outcomes, a screw spacing of 5.5H is recommended for design applications under four-point bending conditions.

Keywords: *cold-formed steel, built-up box beams, tie constraint at screws spacing, experiment*

1. PENDAHULUAN

Cold-formed steel (CFS) menawarkan rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, kekakuan struktural, fleksibilitas desain, dapat didaur ulang, tahan api, efisiensi biaya [1], [2], [3], [4], serta kualitas manufaktur yang seragam jika dibandingkan dengan baja *hot-rolled* [1], [5]. Sifatnya yang ringan, geometri yang presisi, dan permukaan yang halus memudahkan pengendalian mutu yang lebih baik dan pemasangan yang cepat pada konstruksi modern. Dalam aplikasi seperti rangka, gording, kuda-kuda, dan sistem lantai, desain balok harus mempertimbangkan kapasitas momen, kekakuan, geser, interaksi lentur–geser, keruntuhan lokal pada badan (*web crippling*), ketahanan tekuk, dan panjang bentang, yang umumnya dipengaruhi oleh lendutan pada bentang panjang, lentur pada bentang menengah, dan gaya geser pada bentang pendek [6], [7].

Structural instability merupakan perhatian penting dalam kinerja elemen CFS, karena rasio kelangsingannya yang tinggi membuat elemen-elemen ini rentan mengalami tekuk sebelum mencapai leleh. Elemen CFS dapat menunjukkan beberapa mode tekuk, termasuk tekuk lokal, distorsional, tekuk lentur, dan tekuk lateral–torsional, tergantung pada geometri penampang dan panjang elemen [8]. Mode tekuk utama meliputi: tekuk lokal (*local buckling*), di mana elemen pelat individu seperti sayap atau badan mengalami deformasi akibat tekan, sehingga mengurangi kekakuan tanpa harus menyebabkan kegagalan langsung [2], [6], [7], [9]; tekuk lateral–torsional (LTB), yaitu mode tekuk global yang melibatkan puntiran dan perpindahan lateral penampang saat mengalami pembebanan lentur [10], [11], yang dapat dicegah dengan memberikan pengekang lateral [12], [6]; dan tekuk distorsional (*distortional buckling*), yang ditandai dengan perubahan bentuk penampang, biasanya akibat lenturan *lip*-sayap atau badan, dan menjadi kritis terutama pada penampang terbuka ber dinding tipis [9], [7]. Selain itu, *flange buckling* sering kali menjadi mekanisme kegagalan dominan, yang terjadi saat distribusi tegangan meningkat secara merata dari pusat penampang menuju ujung sayap [8].

Elemen CFS sering diproduksi dengan penampang terbuka yang simetris tunggal atau simetris titik karena fleksibilitas dan kemudahan proses produksinya. Namun, penampang terbuka tersebut memiliki kekakuan torsi yang sangat rendah. Untuk mengatasi masalah ini, CFS dapat difabrikasi menjadi penampang *built-up sections* [13]. Dengan menghubungkan dua profil kanal menggunakan *self-drilling screws* dapat membentuk *built-up sections*. Penampang *built-up* ini dapat diatur dalam berbagai konfigurasi, termasuk *back-to-back (BTB)*, *face-to-face (FTF)*, *box sections*, *gapped*, *angle*, dan bentuk penampang lainnya [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23]. Penggunaan *tie constraint at the screws* yang terletak di sayap atas dan bawah membantu mencegah masing-masing elemen mengalami tekuk secara *independent* [13], [17]. Meskipun demikian, penampang rakitan hanya dihubungkan pada titik-titik tertentu sepanjang panjang elemen, sehingga perilaku struktural dari penampang rakitan CFS menjadi lebih kompleks dibandingkan dengan elemen tunggal berpenampang terbuka [6].

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh jarak *tie constraint at screws* pada CFS *built-up box beams* yang diuji terhadap pembebanan lentur empat titik (*four-point flexural loading*). Selain itu, penelitian ini juga akan mengkaji penggunaan *non-screwed wooden block* yang ditempatkan pada lokasi beban terpusat pada beberapa balok, kemudian dibandingkan dengan tanpa penggunaan *non-screwed wooden block* tersebut. Perbandingan perilaku mekanis antara kedua jenis balok tersebut akan dianalisis berdasarkan kurva hubungan beban–perpindahan vertikal (*load-vertical displacement*), hubungan momen–kurvatur (*moment-curvature*), serta mode kegagalan yang terjadi.

2. METODOLOGI

2.1 Karakteristik Material

Sejalan dengan penelitian-penelitian sebelumnya [24], [25], profil yang digunakan dalam penelitian ini adalah C 75×35 x 0.75 mm dengan mutu material G550. Uji tarik (*coupon test*) dilakukan untuk menentukan sifat mekanis material sesuai standar ASTM E8/E8M. Spesimen uji berbentuk datar dengan lebar nominal 12.5 mm dan panjang *gauge length* 50 mm. Spesimen uji diambil dari tiga lokasi berbeda pada spesimen yang belum diuji, yaitu bagian tengah dari pelat badan, sayap atas, dan sayap bawah, dengan arah longitudinal. Pemilihan lokasi ini dimaksudkan untuk memastikan material yang diuji belum mengalami tegangan signifikan serta untuk memperoleh informasi mengenai variasi kuat leleh pada setiap bagian profil.

Pengujian dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) berkapasitas 500 kN dengan kendali perpindahan sebesar 0,84 mm/menit. Hasil pengujian menunjukkan bahwa rata-rata kuat leleh adalah 554,48 MPa. Kondisi fisik empat dari enam spesimen sebelum dan sesudah pengujian tarik ditampilkan pada **Gambar 1**.

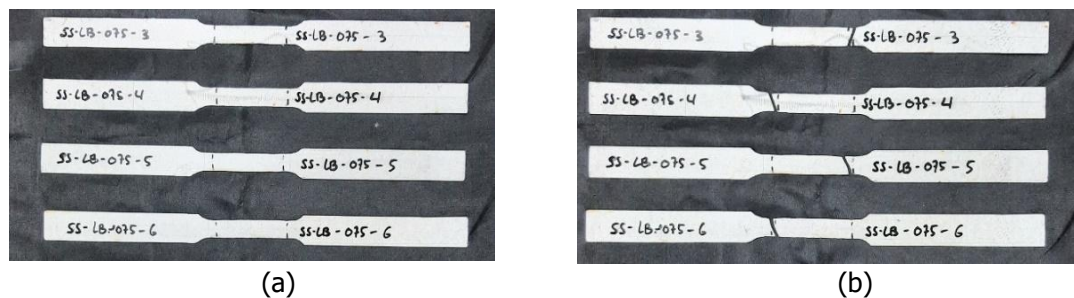


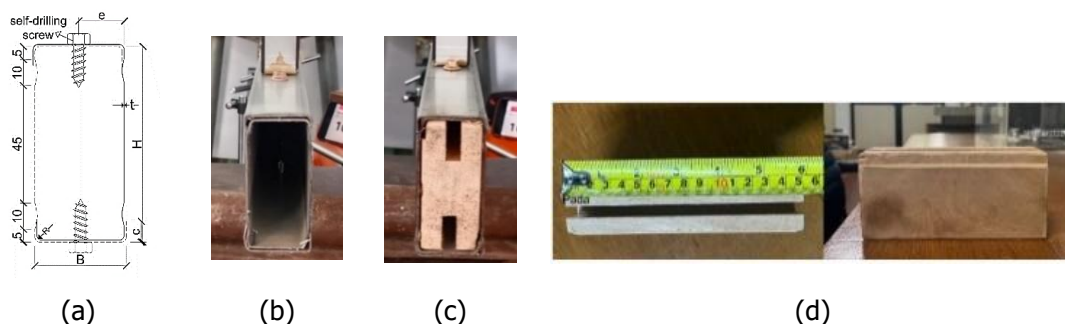
Figure 1. Spesimen uji tarik: (a) sebelum uji tarik, dan (b) setelah uji tarik

2.2 Spesimen Uji dan Pelabelan

Self-drilling screw M2 12-14 x 20 (AISI C1022 Low Carbon) digunakan sebagai *tie constraint at screws* untuk membetuk spesimen *built-up box beams*, seperti pada **Gambar 2**.

Tie constraint at screws dipasang sepanjang bentang longitudinal sayap atas dan bawah balok dengan variasi jarak yang berbeda. Tiga variasi jarak yang digunakan adalah H; 2H; dan 5,5H; dimana H merupakan tinggi spesimen, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3**.

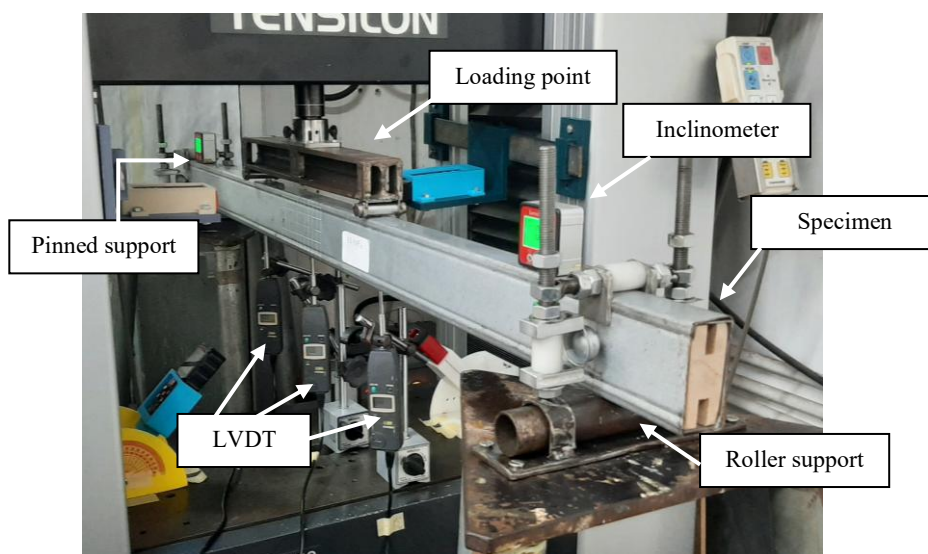
Pelabelan spesimen disederhanakan menjadi "5.5H WF", di mana "5.5H" menunjukkan jarak *tie constraint at screws*; huruf "W" menunjukkan adanya *non-screwed wooden block* yang berfungsi sebagai *stiffener*, dan "F" menyatakan bahwa spesimen diuji dengan *four-point flexural loading*, seperti ditunjukkan pada **Gambar 4** dan **Tabel 1**.



2.3 Set-up Pengujian

Enam spesimen balok dengan panjang total 1.450 mm diuji menggunakan skema *four-point flexural loading*. Tumpuan sendi dan rol ditempatkan pada kedua ujung sehingga menghasilkan bentang bersih $L = 1.300$ mm, seperti ditunjukkan pada **Gambar 5**. Pengujian dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) berkapasitas 50 kN dengan laju pembebanan terkendali sebesar 0,5 mm/menit. Aktuator dihubungkan ke balok penyebar beban dengan panjang $L/3$ (≈ 433 mm) untuk mendistribusikan beban pada dua titik pembebanan.

Lendutan vertikal diukur menggunakan tiga *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT) yang dipasang pada sayap bawah balok di posisi 0,25L; 0,5L; dan 0,75L. Data LVDT direkam secara otomatis setiap 60 detik. Kemiringan pada kedua tumpuan diukur secara manual menggunakan dua *inclinometer* yang ditempatkan dekat titik tumpuan. Seluruh data beban dan perpindahan direkam secara simultan melalui sistem akuisisi data



Gambar 5. Set-up pengujian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam menentukan jarak *tie constraint at screws* yang optimum, enam spesimen—H OF; 2H OF; 5,5H OF; H WF; 2H WF; dan 5,5H WF—telah diuji. Respon hubungan *load-vertical displacement* dan *moment-curvature* dari spesimen-spesimen tersebut ditunjukkan pada **Gambar 6**, **Gambar 7**, dan **Tabel 2**.

Gambar 6 dan **Gambar 7** masing-masing menyajikan hubungan *load-vertical displacement* dan *moment-curvature* dari keenam spesimen. Seluruh spesimen balok mencapai beban puncak antara 6.000 hingga 6.700 N, sedangkan momen puncak berada pada kisaran 1.300.000 hingga 1.500.000 Nmm, yang mencerminkan kapasitas lenturnya. Namun, konfigurasi H OF menunjukkan penurunan tajam pasca-puncak pada baik beban maupun momen.

Seluruh spesimen WF, kecuali H OF, masih mampu mendistribusikan momen setelah mengalami leleh. Kurva penurunan tidak dapat terekam sepenuhnya karena LVDT memiliki batas pengukuran maksimum 25 mm, dan penggunaan hingga kapasitas maksimum tersebut tidak dilakukan demi alasan keselamatan.

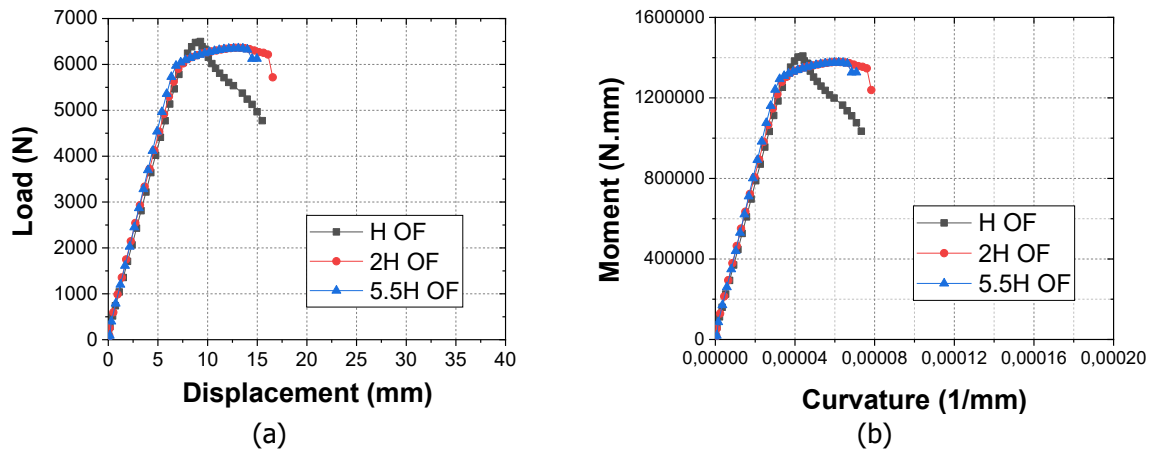


Figure 6. (a) Hubungan (a) Beban-Perpindahan Vertikal, and (b) Momen-Kurvatur dari specimen tanpa *non-screwed wooden block*

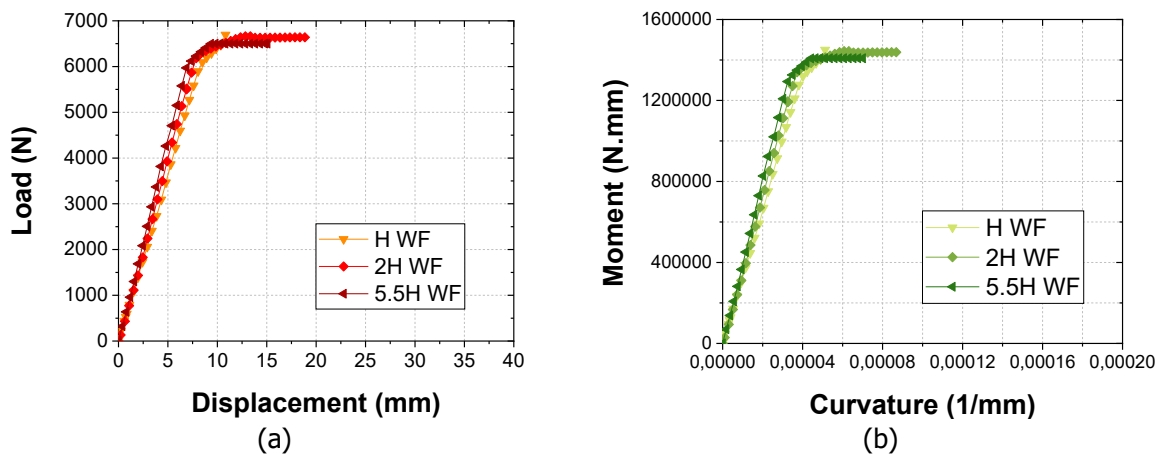


Figure 7. Hubungan (a) Beban-Perpindahan Vertikal, and (b) Momen-Kurvatur dari specimen dengan *non-screwed wooden block*

Spesimen balok dengan dengan *non-screwed wooden block* menunjukkan beban ultimit tertinggi dibandingkan balok tanpa *non-screwed wooden block*. Varian WF menunjukkan rata-rata hampir 4% lebih tinggi beban ultimit dibandingkan varian OF, sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 2**. Semua spesimen balok memperlihatkan kekakuan awal yang serupa hingga sekitar 7 mm perpindahan vertikal—masih berada pada daerah elastis—yang mengindikasikan perilaku elastis yang konsisten sebelum memasuki perilaku nonlinier. Namun demikian; balok 5,5H WF menunjukkan kekakuan lentur yang lebih tinggi dibandingkan varian OF; H WF; dan 2H WF. Varian WF juga menunjukkan bahwa *non-screwed wooden block* berfungsi cukup efektif sebagai *stiffener*, meskipun tanpa sekrup pada bidang kontak antara web dengan sisi wooden block (*non-screwed wooden block*), serta antara *flange* dengan permukaan atas dan bawah balok kayu.

Tabel 2. Perbandingan Hasil Eksperimental terhadap Beban Ultimit

Spesimen	P _{EXP} [N]	Perbedaan persentase P _{EXP} antara WF dan OF [%]
H OF	6.499,003	3,000
H WF	6.693,985	
2H OF	6.361,400	4,718
2H WF	6.661,526	
5,5H OF	6.349,956	2,397
5,5H WF	6.502,176	
Average		3,327

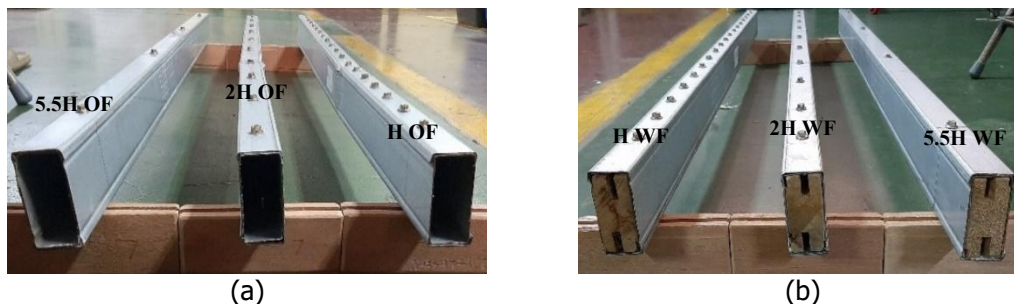
Selain kekakuan, jarak optimum *tie constraint at screws* juga ditentukan oleh dua kriteria lainnya. Kriteria pertama adalah *vertical displacement* linier minimum pada tengah bentang balok di bawah beban elastis maksimum sebesar 6.000 N, seperti ditunjukkan pada **Tabel 2**, di mana balok 5,5H WF menunjukkan *vertical displacement* terkecil yaitu 7,04 mm. Kriteria kedua adalah jumlah total *tie constraint* minimum, sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Perpindahan Vertikal pada Spesimen *Built-Up Box Beam* H; 2H; dan 5,5H terhadap beban maksimum (P) 6.000 N

Spesimen	Perpindahan Vertikal	
	δ_{EXP} [mm]	Deviasi δ_{EXP} terhadap 5,5H [%]
H WF	8,05	14.34
2H WF	7,59	7.79
5,5H WF	7,04	0.00

Tabel 4. Perbandingan Total Jumlah *Tie Constraint At Screws* yang Digunakan antara Spesimen *Built-up Box Beam* H; 2H; and 5,5H

Spesimen	Total Jumlah <i>Tie Constraint at Screws</i> [buah]	Persentase Jumlah <i>Tie Constraints at Screws</i> terhadap 5,5H [%]
H WF	36	350
2H WF	20	150
5,5H WF	8	100



Gambar 8. Perbandingan deformasi specimen setelah pengujian: (a) tanpa *non-screwed wooden block* dan (b) dengan *non-screwed wooden block*

Spesimen	H	2H	5,5H
OF			
WF			

Gambar 9. Perpindahan lateral (*lateral displacement*) dan rotasi pada tengah bentang dari enam specimen terhadap beban maksimum berdasarkan hasil pengukuran alat *laser distance digital*. Garis biru (sebelum pembebanan), dan garis merah (pada beban maksimum).

Tabel 3 dan **Tabel 4** menunjukkan bahwa jumlah tie constraint at screws pada spesimen balok H dan 2H secara signifikan lebih banyak dibandingkan pada spesimen 5,5H. Meskipun hanya menggunakan delapan *tie constraint at screws*, spesimen 5,5H WF menghasilkan *vertical displacement* paling kecil di antara seluruh varian WF. Hal ini mengindikasikan bahwa efisiensi penggunaan sambungan pada konfigurasi 5,5H lebih baik dibandingkan konfigurasi H dan 2H setelah pengujian.

Gambar 8 memperlihatkan kondisi global keenam spesimen balok setelah pengujian, sedangkan **Gambar 9** menunjukkan kondisi penampang pada tengah bentang masing-masing balok saat beban maksimum. Pada gambar tersebut juga disajikan data *lateral displacement* dan rotasi penampang pada tengah bentang untuk semua varian OF dan WF, yang diperoleh menggunakan alat pengukur *laser distance digital* selama pengujian. Garis biru merepresentasikan bentuk penampang sebelum pembebanan, sementara garis merah menunjukkan deformasi penampang pada kondisi beban maksimum.

Hasil pengamatan pada **Gambar 9** mengonfirmasi bahwa penampang tengah bentang spesimen 5,5H WF mengalami *lateral displacement* dan rotasi yang lebih kecil dibandingkan spesimen lainnya. Temuan ini menguatkan bahwa konfigurasi 5,5H WF memberikan stabilitas lentur yang lebih baik dibandingkan varian OF; H WF; maupun 2H WF.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menyelidiki jarak *tie constraint at screws* yang optimum pada CFS *built-up box beams* dari dua profil C 35x75x0,75 yang disusun secara *face-to-face* di bawah uji lentur *four-point loading*. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa jarak *tie constraint at screws* berpengaruh signifikan terhadap kapasitas beban ultimit, lendutan, dan rotasi lateral. Pemasangan *non-screwed wooden block* terbukti meningkatkan kapasitas beban ultimit dan kekakuan, sekaligus menunda kegagalan lokal.

Dibandingkan konfigurasi H dan 2H WF, konfigurasi 5.5H WF menghasilkan lendutan terkecil, kapasitas lentur yang lebih baik, serta efisiensi waktu dan biaya pemasangan akibat jumlah pemakaian *tie constraint at screws* yang lebih sedikit. Oleh karena itu, konfigurasi 5.5H WF direkomendasikan sebagai jarak *tie constraint at screws* yang optimum untuk aplikasi praktis pada kondisi *four-point flexural loading*. Penelitian lanjutan diperlukan untuk mengevaluasi perilaku balok kotak rakitan CFS di bawah kondisi pembebanan tak simetris.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W.-W. Yu, R. A. LaBoube, and H. Chen, *Cold-formed steel design*. Wiley Online Library, 2010.
- [2] E. Gad, "Cold-Formed Steel Design Seminar," presented at the Cold-Formed Steel Design Seminar, Surabaya and Jakarta, 2014.
- [3] F. Wang, J. Yang, I. Azim, L. Bai, and Y. Ma, "Experimental and numerical evaluations of the distribution and effect of roll-forming residual stress on Cold-Formed Steel sigma beams," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 167, p. 105978, 2020.
- [4] M. Billah, M. M. Islam, and R. B. Ali, "Cold formed steel structure: An overview," *World Scientific News*, no. 118, pp. 59-73, 2019.
- [5] W. Dewobroto, "Pengaruh Bentuk dan Ukuran Washer (Ring) pada Perilaku Sambungan Baut Mutu Tinggi dengan Pretensioning di Baja Cold-Rolled.," Doktor, Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan, 2008.

- [6] W.-W. Yu, R. A. LaBoube, and H. Chen, *Cold-Formed Steel Design*. 111 River Street, Hoboken, NJ 07030, USA: John Wiley & Sons, 2020.
- [7] G. J. Hancock, *Design of Cold-Formed Steel Structures (to AS/ANZ 4600:2005)*. AUSTRALIAN STEEL INSTITUT, 2007.
- [8] T. W. Swastika, H. Purnomo, H. W. Ashadi, and P. Soekarno, "A STATE-OF-THE-ART REVIEW OF COLD-FORMED BUILT-UP BEAM SECTIONS," *Applied Research on Civil Engineering and Environment (ARCEE)*, vol. 6, no. 01, pp. 1-10, 2025.
- [9] M. Billah, M. Islam, and R. B. Ali, "Cold formed steel structure: An overview," *World Scientific News*, vol. 118, pp. 59-73, 2019.
- [10] C. Yu and B. W. Schafer, "Local buckling tests on cold-formed steel beams," *Journal of structural engineering*, vol. 129, no. 12, pp. 1596-1606, 2003.
- [11] S.-s. Cheng, B. Kim, and L.-y. Li, "Lateral-torsional buckling of cold-formed channel sections subject to combined compression and bending," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 80, pp. 174-180, 2013.
- [12] *SNI 7971:2013. Struktur baja canai dingin*, B. S. N. (BSN), Jakarta, 2013.
- [13] L. Wang and B. Young, "Behaviour and design of cold-formed steel built-up section beams with different screw arrangements," *Thin-Walled Structures*, vol. 131, pp. 16-32, 2018.
- [14] M. Anbarasu, A. Dar, A. I. Rather, and M. A. Dar, "Effect of external strengthening on the flexural capacity of cold-formed steel beams," *Materials Today: Proceedings*, vol. 39, pp. 1270-1274, 2021.
- [15] R. Fitrah and A. Melinda, "Behaviour of Cold-formed Steel Back-to-Back Channel Built-Up Sections under Bending," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1041, no. 1: IOP Publishing, p. 012006.
- [16] K. Roy, H. H. Lau, T. C. H. Ting, B. Chen, and J. B. Lim, "Flexural behaviour of back-to-back built-up cold-formed steel channel beams: Experiments and finite element modelling," in *Structures*, 2021, vol. 29: Elsevier, pp. 235-253.
- [17] T. C. H. Ting, K. Roy, H. H. Lau, and J. B. Lim, "Effect of screw spacing on behavior of axially loaded back-to-back cold-formed steel built-up channel sections," *Advances in Structural Engineering*, vol. 21, no. 3, pp. 474-487, 2018.
- [18] K. Kang, T. Chaisomphob, W. Patwichaichote, and E. Yamaguchi, "Experimental and Numerical Investigation on Cold-formed Steel C Back-to-Back Beams," *IPTEK Journal of Proceedings Series*, vol. 3, no. 6, 2017.
- [19] M. A. Dar, N. Subramanian, A. Dar, M. Anbarasu, J. B. Lim, and M. Atif, "Behaviour of partly stiffened cold-formed steel built-up beams: Experimental investigation and numerical validation," *Advances in Structural Engineering*, vol. 22, no. 1, pp. 172-186, 2019.
- [20] R. Sujitha *et al.*, "Analytical and Experimental Study on Cold-Formed Steel Built-Up Sections for Bending," *Materials*, vol. 15, no. 20, p. 7140, 2022.
- [21] H. T. Tran, "Flexural Strength Investigation on Cold-Formed Steel Face-To-Face C-Section Beam," Master of Science, Engineering and Technology, Sirindhorn International Institute of Tech Thammasat University, 2015.
- [22] S. Selvaraj and M. Madhavan, "Structural design of cold-formed steel face-to-face connected built-up beams using direct strength method," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 160, pp. 613-628, 2019.
- [23] M. V. T. Trung, "Improvement on Design of Cold-Formed Steel Box Beams Made of Built-Up C-Sections," Master of Science, Engineering and Technology, Sirindhorn International Institute of Technology Thanmmasat University, 2020.
- [24] T. W. Swastika, H. Purnomo, R. Apriansyah, and M. R. Muslih, "Cold-formed section residual stress determination using cos-alpha x-ray diffraction technique and elastic

- stress–Strain relations," in *AIP Conference Proceedings*, 2024, vol. 2967, no. 1: AIP Publishing.
- [25] T. W. Swastika, H. Purnomo, H. W. Ashadi, M. R. Muslih, R. Apriansyah, and M. S. H. bin Mohd Sani, "Two Uncoating Techniques for Measuring Cold-Formed Steel Residual Stress Using Cos- α X-ray Diffraction Method," *International Journal on Advanced Science, Engineering & Information Technology*, vol. 14, no. 6, 2024.